

UDK 528.28:550.34.016:550.343.6:551.242:629.783(497.521.2)

Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

*Ovaj rad posvećujemo našem dragom i voljenom
kolegi i prijatelju prof. dr. sc. Asimu Bilajbegoviću*

Kompresija Zemljine kore dva dana prije potresa 22. ožujka 2020. u Zagrebu

Nikola SOLARIĆ, Miljenko SOLARIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U prvom poglavlju dan je kratki pregled potresa koji su se dogodili u Zagrebu i njegovoj okolici u prošlosti, te ovih posljednjih magnituda 5,4 i 5,0, koji su 22. 03. 2020. nanijeli velike štete na više od 25 000 zgrada. Ti su se potresi dogodili 140 godina nakon velikog potresa koji je razorio Zagreb 1880. godine. Epicentri potresa 22. 03. 2020. bili su u blizini epicentra velikog zagrebačkog potresa iz 1880. godine. Međutim, između 1880. i 2020. bilo je još nekoliko potresa koji nisu bili tako razorni kao onaj iz 1880. godine, ali su bili veći od ovih dvaju posljednjih. Analizom 24-satnih GNSS mjerenja referentnih GNSS točaka Hrvatskoga pozicijskog sustava (CROPOS) po našoj metodi razlika dnevnih udaljenosti između postaja dokazalo se da je dva dana prije potresa 22. ožujka došlo do skraćivanja udaljenosti između referentnih GNSS točaka. Drugim riječima, došlo je do kompresije u Zemljinoj kori. Ta kompresija prije potresa već se pokazala u analizi GNSS mjerenja duljina između GNSS točaka pozicijskih sustava u 4 prethodna potresa: kod Kraljeva (2010.), Drežnice (Senj, 2013.), Skopja (2016.) i u blizini Zagreba (2018.). Stoga se predlaže da se podaci CROPOS-a osim u geodeziji upotrebljavaju i u seizmologiji. U tu svrhu trebalo bi osigurati kontinuirano računanje koordinata referentnih GNSS točaka na temelju kojih bi se odredila kompresija u Zemljinoj kori, tj. pojava seizmičkih aktivnosti. Uz pomoć ostalih geofizičkih podataka mjerenja i metoda možda će se moći i predvidjeti koje će seizmičke aktivnosti rezultirati potresom. Međutim, za pouzdanije rezultate praćenja seizmičkih aktivnosti GNSS metodom mjerenja trebalo bi ispitati stabilnost referentnih GNSS točaka koje bi bile postavljene na međusobno manjoj udaljenosti. Te bi lokacije trebale biti određene na temelju geoloških podataka i istraživanja. Osim toga udaljenosti između GNSS točaka ne bi smjele biti ni prekratke.

Ključne riječi: GNSS referentne postaje, CROPOS, potresi, magnituda, kompresija, Zagreb.

¹ Prof. emer. dr. sc. Nikola Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: nsolaric@geof.hr
Prof. dr. sc. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: msolaric@geof.hr

1. Potresi na području Zagreba i u bližoj okolini

U medvedničkom epicentralnom području nastali su najjači potresi na području grada Zagreba. Žarišta tih potresa vezana su uz jugoistočne obronke Medvednice, a neki od njih imali su žarište od Podsuseda do Zeline.

Ujutro 22. ožujka 2020. godine dva su potresa snažno potresla Zagreb i njegovu okolicu. To je bilo tako po mišljenju građana iako seizmolozi potrese između magnituda 5,0 i 5,9 po Richteru ubrajaju u umjerene potrese (Oluić 2015, str. 62). To se vidi i iz tablice 1 klasifikacije potresa.

Prvi potres u Zagrebu 22. 03. 2020. godine dogodio se u 5^h 24^m 02,8^s po UTC-u, a drugi potres bio je u 6^h 01^m 20,5^s po UTC-u istog dana, tj. 37 min i 17,7 sek poslije. Njihove magnitude bile su 5,4 i 5,0 M_L po Richteru, a njihovi epicentri imali su geografske koordinate ($\varphi = 45,87^\circ$ i $\lambda = 16,02^\circ$) i ($\varphi = 45,87^\circ$ i $\lambda = 16,00^\circ$), tj. u predjelu Markuševca na jugoistočnoj strani Medvednice. Epicentar velikog potresa iz 1880. godine bio je u blizini i imao je koordinate ($\varphi = 45,91^\circ$ i $\lambda = 16,11^\circ$). Dakle, razlika po geografskoj koordinati φ iznosila je samo +0,04°, a po koordinati λ razlika je iznosila +0,09°, odnosno +0,11°. Naime, najjači potres u Zagrebu, koji se dogodio 9. studenoga 1880. godine, imao je magnitudu $M_L = 6,3$ po Richteru s epicentrom u Kašini ($\varphi = 45,91^\circ$ i $\lambda = 16,11^\circ$). Seizmolozi ga ubrajaju u jake potrese (vidi tablicu 1), a njegov intenzitet u epicentru bio je $I_0 = IX$ stupnjeva po MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) ljestvici u blizini naselja Kašina i Planina (Cvijanović 2011, str. 1, prilog 1). On je razrušio grad Zagreb gotovo do temelja.

Bila su još i dva jača potresa, koji se obično danas u novinama ne spominju:

- 17. prosinca 1905. intenziteta u epicentru $I_0 = VII$ –VIII stupnjeva po MCS ljestvici i magnitude $M_L = 5,6$ po Richteru s epicentrom između naselja Planina i Čučerje.
- 2. siječnja 1906. intenziteta u epicentru $I_0 = VIII$ stupnjeva po MCS ljestvici i magnitude $M_L = 6,1$ po Richteru s epicentrom također između Planine i Kašine. Dubina žarišta (hipocentara) tih najjačih potresa bila je procijenjena na oko 5 km do 10 km.

Također, posebno je značajno da je žarište potresa 17. prosinca 1905. bilo ispod grada (intenziteta $I_0 = VII$ stupnjeva po MCS ljestvici i magnitude $M_L = 5,6$ po Richteru), u predjelu oko Šestina (Jurak i dr. 1998). Inače, seizmolozi taj potres ubrajaju u lagane potrese (vidi tablicu 1).

Kao što se vidi iz izloženog, izvori najjačih potresa u Zagrebu nalaze se u medvedničkom epicentralnom području. Naime, epicentri tih potresa vezani su uz južne obronke Medvednice, i to na istočnom dijelu. Na mrežnoj stranici EMSC-a traženi su epicentri potresa u granicama područja $\varphi_{\min} = 45,50^\circ < \varphi < \varphi_{\max} = 46,19^\circ$ i $\lambda_{\min} = 15,80^\circ < \lambda < \lambda_{\max} = 16,25^\circ$, i to u vremenskom razdoblju od 8. 03. 2020. do 14. 04. 2020. s dubinom žarišta (hipocentra) od 1 km do 20 km i magnitudama od 1 do 7 po Richteru. Tako je dobivena tablica 1 popisa potresa. Iz nje se vidi da nije bilo potresa od 8. 03. do 14. 03. 2020. ni poslije, sve do dva potresa 22. 03. 2020., koji su imali magnitude 5,4 i 5,0. Oni su

prouzročili prilično velike štete u Zagrebu. Tada je oštećeno 26 000 objekata, i to najviše unutrašnjost crkava i zgrada te dimnjaci, a srušen je i vrh južnog tornja katedrale. Međutim, da je taj potres imao magnitudu 6,3 poput onoga 1880. godine, tada bi šteta na građevinskim objektima bila znatno veća, a bilo bi i puno ljudskih žrtava.

Tablica 1. *Potresi kod Zagreba od 8. ožujka do 14. travnja 2020. koji su zabilježeni u EMSC-u.*

Datum	UTC	φ [°]	λ [°]	D [km]	I_0	M_L
2020-04-11	03:05:19,9	45,85	16,03	1	III	1,1
2020-04-10	06:50:03,8	45,88	16,04	8	III	2,5
2020-04-09	03:30:44,0	45,88	16,01	9	III	2,3
2020-04-08	09:43:03,9	45,87	16,06	2	IV	1,3
2020-04-08	00:54:33,0	45,88	16,00	2	IV	1,1
2020-04-07	02:12:27,1	45,90	16,03	1	III	1,4
2020-04-05	20:30:33,7	45,87	16,16	10	III	2,0
2020-04-05	08:43:59,7	45,88	15,99	2	III	1,8
2020-04-03	23:26:24,1	45,88	16,03	1	III	1,1
2020-04-03	17:15:45,9	45,80	15,95	1	III	1,1
2020-04-03	07:58:23,3	45,80	15,95	2	III	2,6
2020-04-02	02:32:27,5	45,90	16,03	1	III	1,0
2020-04-01	06:41:00,9	45,90	15,99	1	III	1,2
2020-04-01	02:29:52,4	45,90	15,99	1	III	1,0
2020-03-29	21:11:28,4	45,88	16,03	1	III	1,4
2020-03-29	02:19:32,2	45,88	16,03	4	III	1,5
2020-03-28	12:48:56,9	45,87	16,16	1	III	1,5
2020-03-27	15:41:20,6	45,90	15,99	2	III	1,4
2020-03-26	08:38:52,2	45,83	16,09	1	III	1,8
2020-03-26	06:12:27,0	45,88	16,03	4	III	1,9
2020-03-24	19:53:49,6	45,88	15,98	5	IV	3,2
2020-03-23	10:12:53,2	45,85	15,96	10	IV	3,7
2020-03-23	02:00:30,0	45,88	16,02	7	IV	3,0
2020-03-22	18:00:20,5	45,83	15,98	2	III	2,9
2020-03-22	15:15:13,3	45,78	15,99	2	III	2,8
2020-03-22	09:11:57,0	45,87	16,05	4	V	3,3
2020-03-22	08:10:26,9	45,87	15,95	2	V	3,0
2020-03-22	08:04:01,5	45,87	15,98	7	V	3,1
2020-03-22	06:41:05,6	45,89	16,02	2	V	3,7
2020-03-22	06:01:20,5	45,87	16,00	10	VI	5,0
2020-03-22	05:24:02,8	45,87	16,02	10	VII	5,4
2020-03-14	00:50:57,9	45,99	16,00	5	IV	2,9

(Opis kratica u tablici 1: Datum, UTC – vrijeme, φ – geografska širina i λ – geografska dužina epicentra potresa, D – dubina hipocentra (žarišta) potresa izražena u kilometrima, I_0 – intenzitet potresa u epicentru po MCS ljestvici, M_L – magnituda potresa po Richteru).

Vrlo je velika razlika u oslobođenoj energiji između potresa magnitude 6,1, koliko je iznosio potres u siječnju 1906., i onoga magnitude 6,3 iz 1880. godine, iako se to ne čini tako samo kada se gledaju iznosi magnituda. Na primjer, između magnitude 5,5 stupnjeva i 6,1 razlika je otprilike 15 puta. Naime, energija koja se oslobađa tijekom potresa eksponencijalno raste.

Na području Zagreba od 1901. do 1970. godine zabilježeno je deset potresa magnituda jačih od 5,0. To navodi Josip Mokrović, koji je 1950. godine u svojoj knjizi izložio prikaz potresa u Zagrebu od 1502. do 1838. godine. Osim toga naveo je da se u tom vremenskom razdoblju u Zagrebu dogodio 661 potres te da je njih 84% imalo žarište u području Medvednice.

Također, primijetio je da se najviše potresa s najjačim intenzitetom u Zagrebu događa zimi. Osim toga, autor je u knjizi citirao procjenu da je maksimalna moguća magnituda potresa za Medvednicu 6,5 stupnjeva po Richteru.

Najjači potres u Zagrebu dogodio se 9. studenoga 1880. godine i, kako smo naveli, njegova je magnituda iznosila 6,3 stupnja po Richteru. Drugi po jačini je potres od 2. siječnja 1906., koji je imao magnitudu 6,1 po Richteru.

Dominantno epicentralno područje u pogledu seizmičke aktivnosti udaljeno je od središta grada samo 16 km i referira se kao plošni izvor (Kašina). Međutim, posljednji potresi u Markuševcu udaljeni su od središta Zagreba samo 7 km. Gradsko je područje pod utjecajem rasjedne zone žumberačko-medvedničko-kalničkog rasjeda koja se može smatrati linijskim izvorom. Prema spoznajama grad Zagreb je unutar seizmički najaktivnije zone unutrašnjeg dijela Hrvatske. To je poznato zagrebačko epicentralno područje u kojem su potresi posljedica sučeljavanja struktura panonskog bazena i onih "medvedničko-kalničkog pružanja". Ta zona zahvaća sjeverne obronke Bilogore, Kalnik, Ivanšćicu, Medvednicu, Vukomeričke gorice i Žumberačku goru.

Iz tablice 1 vidi se također da je 22. ožujka 2020. bilo ukupno zabilježenih 8 potresa u EMSC-u (European Mediterranean Seismological Centre – Europski mediteranski seizmološki centar). Međutim, stvarno je bilo još više manjih potresa koji nisu zabilježeni u EMSC-u. Smirivanje tla trajalo je još danima. Tako je u tablici 1 zapisan samo izvjestan broj potresa manjih magnituda.

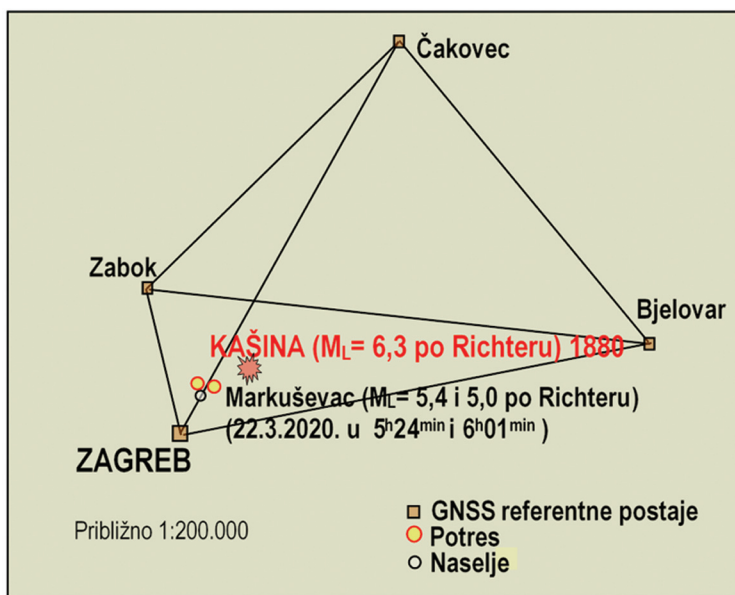
Kad se prikažu položaji epicentara potresa od 22. 03. do 11. 04. 2020. na karti Zagreba, vidi se da je u tom vremenskom razdoblju bilo čak nekoliko epicentara potresa:

- na jugu u Novom Zagrebu (južnije od jezera Budek) vjerojatno u naselju Središću,
- na zapadu kraj Mikulića i ispod Medvedgrada,
- na sjeveru kraj Adolfovca, Rusinskog brijega, a u Markuševcu je bilo više epicentara, među ostalim i ona dva najjača,
- na jugoistoku bio je epicentar potresa u Novom Brestju i u Soblincu,
- unutar grada Zagreba bio je epicentar potresa ispod groblja Mirogoj.

2. Analiza dnevnih promjena duljina između CROPOS-ovih referentnih GNSS postaja i određivanje kompresije Zemljine kore

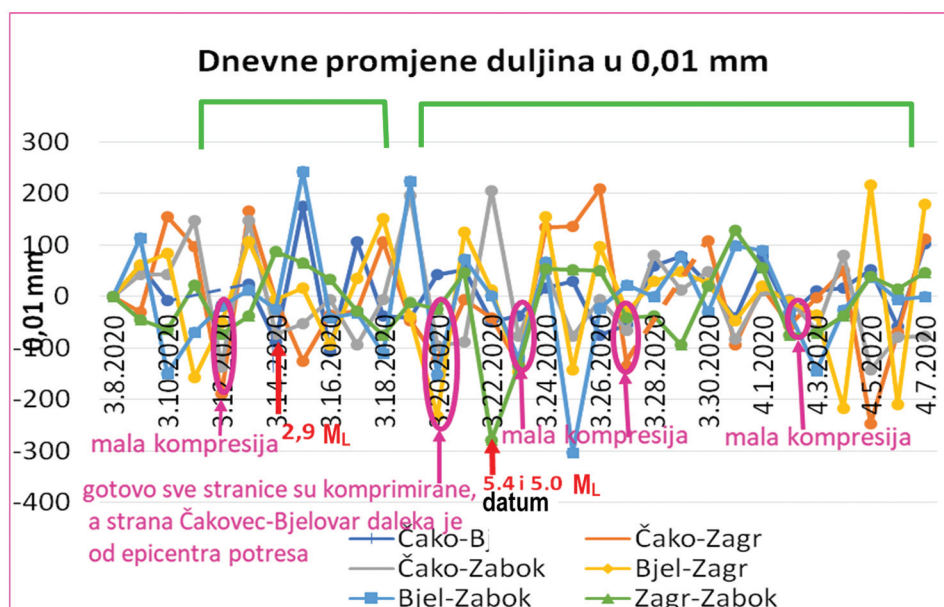
Jednodnevna (24-satna) GNSS mjerenja izjednačena s pomoću softvera *Bernese* vrlo su točna, jer se tijekom dana skupi golema količina podataka. Međutim, važno je da se udaljenosti između referentnih točaka kreću maksimalno do 70 km, odnosno do 100 km. U tom slučaju radioimpulsi odaslani s GNSS satelita do dvije susjedne referentne GNSS točke prolaze kroz ionosferu i troposferu približno istim putem, jer se ti sateliti nalaze u orbitama udaljenim više od 20 000 km od središta Zemlje. Na taj su način pogreške u računanju utjecaja atmosfere za dvije susjedne točke približno jednake, te se dobije relativno dobra njihova udaljenost u mjerenom trenutku. Ako istovremeno dolazi do skraćivanja nekih udaljenosti između susjednih GNSS referentnih postaja, tada se može govoriti o *kompresiji Zemljine kore*.

U ovom radu analizirane su dnevne promjene duljina između referentnih GNSS točaka CROPOS-a: Čakovec, Bjelovar, Zabok i Zagreb (slika 1). Nakon nešto manje kompresije 12. 03. 2020. slijedio je prethodni potres 14. 03. 2020. magnitude 2,9 po Richteru. Zatim se pokazalo da su potresi 22. 03. 2020. u Zagrebu nastupili približno 2 dana nakon najveće kompresije Zemljine kore, koja je bila 20. 03. 2020. (slika 2).



Slika 1. Dio CROPOS-ove GNSS referentne mreže s koje je određena kompresija Zemljine kore dva dana prije potresa 22. 03. 2020.

Nakon tih potresa bilo je još kompresija, i to: 23. 03., 27. 03. i 2. 04., nakon kojih je slijedio niz potresa manjih magnituda.



Slika 2. Dnevne promjene duljina između CROPOS-ovih referentnih GNSS točaka.

Dnevne promjene duljina između CROPOS-ovih referentnih GNSS točaka pokazuju da je dva dana prije potresa nastala kompresija u Zemljinoj kori. Stranica Čakovec–Bjelovar *najudaljenija je od budućeg potresa i zato na njoj nije došlo do kompresije.*

3. Zaključak

U radu Solarić, N. i Solarić, M. (2012) prvi je put pokazano da se iz permanentnih GNSS mjerenja u sklopu pozicijskih sustava može odrediti kompresija Zemljine kore dva ili tri dana prije potresa. Nakon toga također je pronađeno u radu Solarić, N. i dr. (2017) da je iz GNSS mjerenja određena kompresija Zemljine kore, i to dva dana prije potresa u Drežnici pokraj Senja (Solarić, N. i dr. 2017). Zatim je također u radu Solarić, N. i dr. (2018) pokazano na isti način da je u Skopju došlo do kompresije Zemljine kore tri dana prije potresa. To se isto dogodilo i u potresu 24. 11. i 26. 11. 2018. u Zagrebu, što je objavljeno u radu Solarić, N. i dr. (2020).

Ovaj rad ponovno pokazuje da bi se GNSS pozicijski sustav CROPOS osim za geodetske potrebe mogao upotrebljavati i u seizmologiji za eventualno predviđanje pojava seizmičkih aktivnosti. U tu svrhu trebalo bi osigurati kontinuirano računanje koordinata referentnih GNSS točaka i praćenje promjena njihovih međusobnih udaljenosti. Na temelju tih rezultata mogla bi se odrediti pojava kompresije Zemljine kore koja upućuje na seizmičke aktivnosti, a uz

pomoć ostalih geofizičkih podataka mjerenja i metoda možda i predvidjeti koje će seizmičke aktivnosti rezultirati potresom.

ZAHVALA. Zahvaljujemo prof. dr. sc. Željku Bačiću i prof. dr. sc. Marinku Oluiću na korisnim savjetima za poboljšavanje kvalitete ovog rada.

Literatura

- Cvijanović, D. (2011): Potresi u Zagrebu i okolici, nakladnik Dragutin Cvijanović, Zagreb.
- Miklin, Ž. (2007): Potresi na zagrebačkom području, http://omagi.hgi-cgs.hr/zagreb_potresi.html, (4. 11. 2018.).
- Oluić, M. (2015): Potresi – uzroci nastanka i posljedice s posebnim osvrtom na Hrvatsku i susjedna područja, Prosvjeta, Zagreb.
- Prelogović, E., Skoko, D., Jamičić, D., Aljinović, B. (1995): Medvednica Fault Zone (Croatia), EUG 8 Symposium, European Union of Geosciences, Terra nova, Abstract Supplement, Strasbourg, 9–13 April 1995, Vol. 7, No. 1, Oxford, p. 41.
- Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, M., Dragaš, M., Lučić, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin, Tectonophysics, Vol. 297, Issues 1–4, 283–293.
- Solarić, N., Solarić, M. (2012): Prijedlog da se u Zagrebu i okolici uz CROPOS-ove stanice postavi i nekoliko GPS (GNSS)-permanentnih stanica za geodinamiku i moguću najavu većeg potresa u sljedećem vremenskom razdoblju, Geodetski list, 66 (89), 3, 149–164.
- Solarić, N., Solarić, M., Pejaković, M. (2017): Dva dana prije potresa u Drežnici 2013. godine došlo je do kompresije terena, Geodetski list, 71 (94), 3, 203–214.
- Solarić, N., Solarić, M., Bogdanovski, Z., Dimeski, S. (2018): Three Days before the Earthquake in Skopje there was a Compression of the Earth's Crust, Geodetski list, 72 (95), 1, 15–35.
- Solarić, N., Solarić, M., Marjanović, M., Bogdanovski, Z., Dimeski, S. (2020): Reference GNSS Stations for Warning on Possibility of Upcoming Earthquake in Zagreb, Earth Sciences, Vol. 9, Issue 3, 100–107.
- Šentija, J. (1980): Potres, Opća enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, sv. 6, Zagreb, 582–583.

Mrežne adrese

URL 1: Richterova ljestvica protiv Mercalli ljestvice, <https://hr.natapa.org/difference-between-richter-scale-and-mercalli-scale-1225>, (30. 7. 2020.).

Compression of the Earth's Crust Two Days before Earthquake 22 March 2020 in Zagreb

ABSTRACT. In the first chapter, a brief overview of the earthquakes that occurred in Zagreb and its surroundings in the past was given, as well as these last of magnitudes 5.4 and 5.0 that destroyed Zagreb on 22. 3. 2020. They have caused major damage to more than 25,000 buildings. These earthquakes occurred after 140 years since the great earthquake, which devastated Zagreb in 1880. The epicenters of the 22. 3. 2020 earthquakes were nearby where the epicenter of Zagreb's great earthquake of 1880 was located. However, between 1880 and 2020 there were several more earthquakes that were not as devastating as this one in 1880, but still larger than these last two. By analyzing 24-hour GNSS measurements of GNSS reference points of the Croatian Positioning System (CROPOS) according to our method of differences of daily distances between stations. It was proved that two days before these earthquakes there were a shortening of the distance between the reference GNSS points. In other words, there was compression in the Earth's crust. This compression has already been shown in the analysis of GNSS measurements between GNSS points of positional systems in 4 previous earthquakes: at Kraljevo (2010), Drežnica (Senj, 2013), Skopje (2016) and near Zagreb (2018), as well as now at the most recent earthquakes in Zagreb in 2020. Therefore, it is proposed that the data of the CROPOS can be used in geodesy and in seismology. In this purposes it is obliged to organize continuous calculation the coordinates of reference GNSS points by Bernese software on the basis of which compression in Earth's crust it is possible to calculate. Also with the help of other geophysical measurement and data it is perhaps possible to predict which seismic activity will result in an earthquake. However, for more reliable monitoring results of seismic activity monitoring by the GNSS measurement method, the stability of reference GNSS points that would be set at a distance between them should be examined. These locations should be determined on the basis of geological data and research. In addition, the distances between GNSS points should not be too short.

Keywords: GNSS reference stations, CROPOS, earthquakes, magnitude, compression, Zagreb.

Primljeno / Received: 2020-10-27

Prihvaćeno / Accepted: 2021-02-02